

歩行者デッドレコニングに基づくハンドヘルド端末の屋内外測位技術

興梠 正克[†] 石川 智也[†] 蔵田 武志[†][†]産業技術総合研究所 サービス工学研究センター 〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第2
E-mail: [†] {m.kourog, tomoya-ishikawa, t.kurata}@aist.go.jp

あらまし 近年、スマートフォンを筆頭として、利用者が持ち歩くハンドヘルド端末に高度なセンシング手段が搭載され、利用者の動きや姿勢、状態等の推定に必要な情報の入手が可能になった。こうした背景により、歩行者デッドレコニング (PDR) と呼ばれる屋内外を問わない歩行者の位置・方位のトラッキング技術の実現性が高まった。本研究では、常時持ち歩いて利用されるハンドヘルド端末上で PDR を実現する上での技術的な課題を明らかにして、それぞれの問題点について、現状のスマートフォン (本研究では iPhone 4 を用いる) と UMPC で実現するための解決策を示す。この解決策の妥当性を検証するため、スマートフォン/UMPC 上で動作する PDR システムを構築した。

キーワード PDR (Pedestrian Dead Reckoning)、ハンドヘルド端末、屋内外測位、歩行者ナビ

Indoor/Outdoor positioning of handheld devices based on pedestrian dead reckoning

Masakatsu KOUROGI[†] Tomoya ISHIKAWA[†] and Takeshi KURATA[†][†] Center for Service Research AIST, Umezono 1-1-1 Tsukuba Central 2, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568, Japan
E-mail: [†] {m.kourog, tomoya-ishikawa, t.kurata}@aist.go.jp

Abstract As handheld devices such as smart phones are equipped with accelerometers, gyroscopes and magnetometers, human walking locomotion and his/her state can be estimated from the sensor data. In this background, indoor/outdoor positioning based on pedestrian dead reckoning (PDR) can be realized by using such devices. In this paper, we address the technical issues to realize PDR localization with handheld devices, and propose method to solve the problems. We build a PDR localization system to evaluate relevance of the proposed solution using smart phones (iPhone 4 from Apple Inc.) and UMPCs.

Keyword: PDR (Pedestrian Dead Reckoning), handheld devices, indoor/outdoor positioning, pedestrian navigation

1. はじめに

近年、利用者が持ち歩くハンドヘルド端末にそのコンテンツ情報を取り込むことを目的として、様々なセンシング手段の搭載が一般的になりつつある。このような背景からハンドヘルド端末 (例えば、スマートフォン・携帯電話) には、人の動きと状態を推定する上で重要な手がかりを提供するセンシング手段である、加速度センサ・磁気センサ・ジャイロスコープ (各 3 軸) を搭載する流れが加速しており、すでにこれらのセンサを搭載したハンドヘルド端末が消費者を対象として全世界で数百万台以上も出回り、その台数はさらに拡大を続ける見通しである。これらのセンサを組み合わせることによって、歩行者デッドレコニング (PDR, Pedestrian Dead Reckoning) に基づく屋内外測位を実現することが原理的に可能であり、ハンドヘルド端末の有力なキラアプリを実現する基礎技術として注目を集めている。

PDR に関する多くの従来研究は、センシング手段の装着位置を人の足先や腰部などに固定して、その装着位置に基づく様々な拘束条件を利用することで、位置と姿勢を推定するアプローチを取っていた[1][2][3]。しかしながら、ハンドヘルド端末にセンシング手段が内蔵されている場合には、利用者による端末の保持姿勢が基本的に自由に変動するため、装着位置を固定した場合には顕在化しない技術的課題がある。

また、世界的に流通している 3 種のセンサを備えたハンドヘルド端末の大半を占めるスマートフォン・携帯電話等では、経済性とコストの観点から、1 個あたり 1-2 ドル程度の安価なセンサが搭載されている。このため、その計測精度には自ずと限界があり、PDR に必要な性能を出すためにはいくつもの技術的な課題がある。特に PDR の性能を決定づける方位角の推定精度に大きなインパクトを与えるジャイロスコープの角速度出力については、その誤差の補正は欠かせない。

本論文では、まずハンドヘルド端末における自由位置・姿勢で保持されることによる PDR の技術的な課題を明らかにして、実際の一般的な利用シーンを想定した上で、その解決手法を提案する。次に、安価なセンサを用いたときのセンサ特性が引き起こす問題の一つであるジャイロスコプのヌルオフセット誤差の推定に関する技術的な課題を取り上げ、その解決方法を提案する。

2. ハンドヘルド端末で動作する PDR の課題

スマートフォン・携帯電話のようなハンドヘルド端末では、様々な保持位置・姿勢での利用が想定される。端末の保持位置・姿勢によっては、歩行動作が引き起こす重心の運動が手や腕による緩衝の作用を受けて、その運動の特性が変化して加速度センサとジャイロスコプに伝達・計測される可能性がある。本節では、この特性の変化に関して調査を行い、PDR の測位性能に与える影響を明らかにする。

次に、保持位置・姿勢が自由であることによって、PDR の不可欠な構成要素の一つである進行方向の推定が困難になるという技術的な課題がある。本節では、加速度ベクトルと角速度ベクトルの各成分に現れる周期的なパターンに着目して、その課題に対する解決策を提案する。

2.1. 端末の保持位置による特性の変化

歩行動作 1 サイクルにおける鉛直方向と進行方向の加速度成分の振幅とその歩行速度の間には統計的に線形関係が成り立つことが、筆者らの腰部装着型 PDR の研究[3]において明らかになっている。この特性を利用して、筆者らが PDR では加速度を積分することなく歩行速度を推定する。本論文では、自由な保持位置・姿勢の PDR においても、この特性を利用して歩行速度を推定できることを予備実験によって示す。この実験では、2 名の被験者がスマートフォン (iPhone 4) を 3 通りの保持位置 (耳に当てて利用している状態、胸ポケットに入れた状態、正対保持して画面が見ている状態) を保った状態で歩行した場合の速度と鉛直方向の加速度成分の振幅の関係を調べる。

図 1 には、この実験結果をプロットしたグラフの一例を示す。ここで、いずれの被験者においても、耳当てと胸ポケットの装着位置については、ほぼ同様の特性で強い線形関係が現れている。一方で、正対保持については、ほかの二つの装着位置とは異なる特性が出ており、そのばらつきも大きいことが読み取れる。この原因は、正対保持姿勢ではスマートフォンの画面を見ようとするため、無意識のうちに手による端末のスタビライズと緩衝の作用が働くため、全体的に加速度成分の振幅が小さくなる。

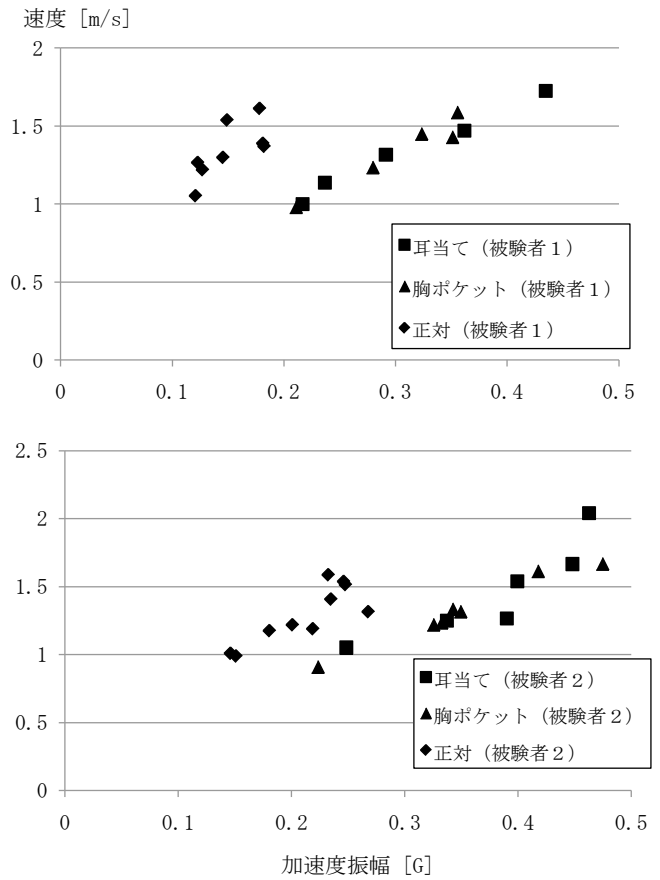


図 1. 保持位置による特性の変化

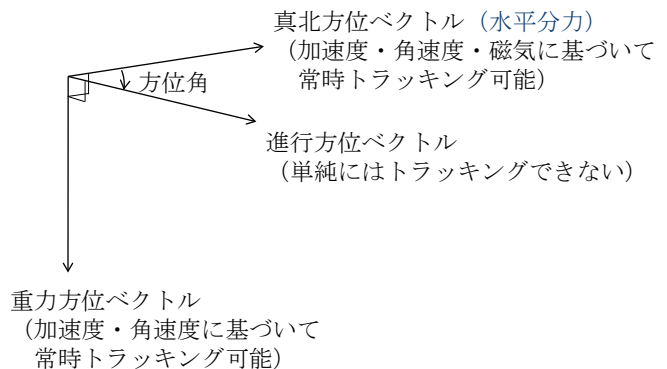


図 2. トラッキングが必要な 3 つの方位

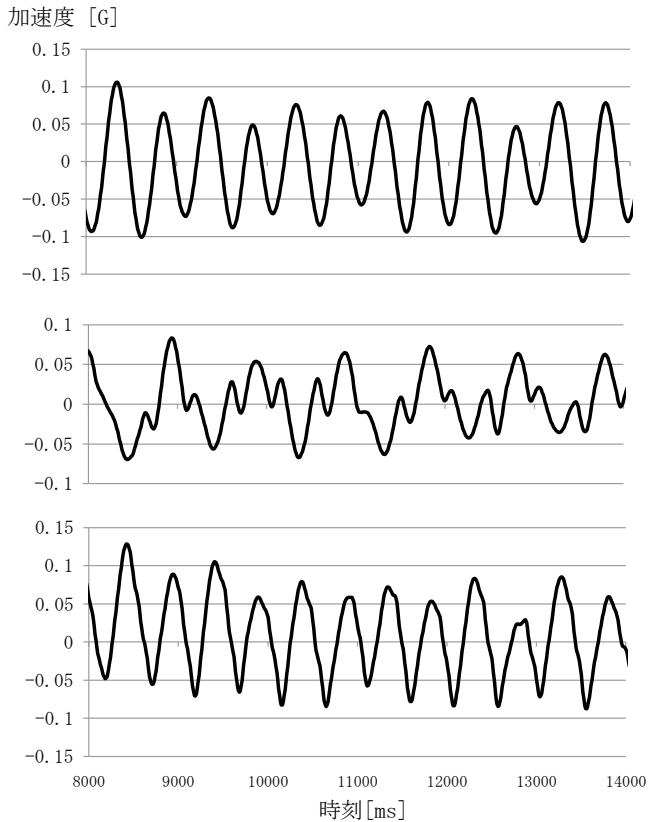


図 3. 加速度成分の時系列パターンの一例
(上段:鉛直方向,中段:左右方向,下段:進行方向)

しかしながら、同一の保持位置においては単一の線形パラメータで説明可能であるが、異なる保持位置では異なる線形パラメータを用いる必要となるケースがあることが分かる。

2.2. 進行方位の推定

PDR においては、加速度・角速度・磁気ベクトルのセンサデータに基づいて端末の姿勢角を常時推定することが可能である。しかしながら、図 2 に示す進行方位ベクトルは、ハンドヘルド端末が歩行者に対して固定されていない場合は基本的に未知であり、姿勢角推定の枠組とは異なる手法によって推定する必要がある。本節では、端末の保持姿勢が一定時間は同一であることを制約条件として用いて、その期間内の進行方位を推定する手法を示す。

2.2.1. 加速度・角速度の典型的なパターン

人の歩行動作は高度に統制された再現性の高い運動である。このため、人の重心に着目すると、その加速度成分のパターンは鉛直方向と進行方向、左右方向について、それぞれ図 3 に示す特徴を呈する。これらの加速度成分のパターンは、歩行動作時における人の重心の位置の 2 階微分が現れたものであり、このパターンは医学的にもよく知られた現象である[5]。

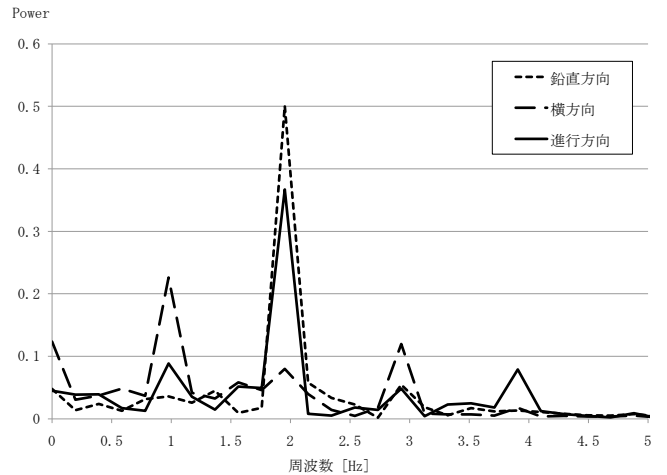


図 4. 加速度成分(図 3)のパワースペクトラム

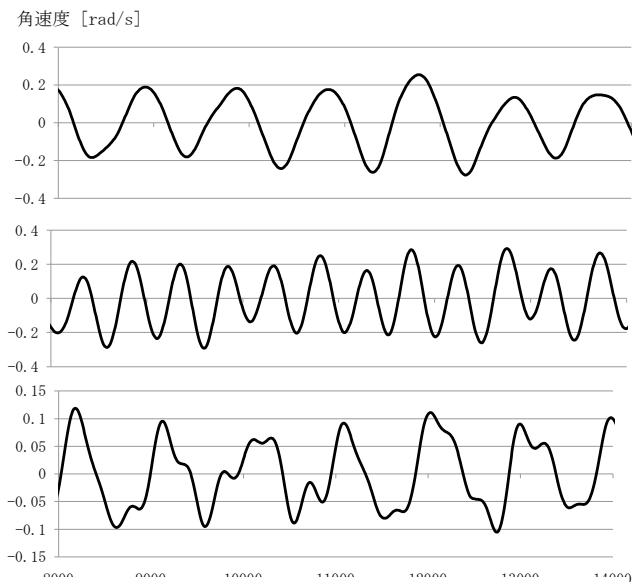


図 5. 角速度成分の時系列パターンの一例
(上段:ヨー軸周り,中段:ピッチ軸周り,
下段:ロール軸周り)

ここで、それぞれの成分の周期に着目すると、鉛直方向と進行方向の成分には 1 歩で 1 周期のパターンが現れており、左右方向の成分については 2 歩（左右それぞれの 1 歩ずつ）で 1 周期のパターンが現れていることが分かる。前者の場合、足の着地と着地の間が一つのパターンを形成しているのに対して、後者は、右足と左足の着地のペアが一つのパターンを形成しているため、そのような周期性が現れる。

図 4 に示した加速度成分に対してそれぞれ高速フーリエ変換 (FFT) を適用して得られたパワースペクトラムを図 4 に示す。なお、この例では、FFT の時間窓は 5.12 秒 (サンプリングレート 100Hz・512 点) である。図 4 から明らかなように、鉛直方向と進行方向の

表 1. 加速度（微分）・角速度パターンの周期

	加速度（微分）	角速度
鉛直方向軸 （ヨー軸）	歩行周波数	歩行周波数 × 1/2
左右方向軸 （ピッチ軸）	歩行周波数 × 1/2	歩行周波数
進行方向軸 （ロール軸）	歩行周波数	歩行周波数 × 1/2

加速度成分には、歩行動作の基本周波数（2.2Hz 近傍）にピークが現れている。一方で、左右方向の加速度成分については、その 2 分の 1 の周波数（1.1Hz 近傍）にピークが現れている。

次に角速度の各軸周りの成分についても、加速度成分と同じく周期性のあるパターンが現れることが知られている。図 5 には、鉛直軸周り（ヨー）と進行軸周り（ロール）、左右軸周り（ピッチ）の角速度の時系列パターンの一例を示す。この角速度成分においては、ヨー軸周りとロール軸周りの成分には、2 歩で 1 周期のパターンが現れて、ピッチ軸周りの成分には、1 歩で 1 周期のパターンが現れていることが読み取れる。ヨー軸の成分については、右足と左足を交互に踏み出すときに発生する旋回の角速度成分が現れている。これは、

図 6 には、これらの角速度成分の FFT によるパワースペクトラムを示す。

2.2.2. 加速度微分による典型的なパターン

スマートフォン・携帯電話などに搭載される安価な MEMS 加速度センサにおいては、ゼロ G オフセット誤差が無視できないレベルで存在する。一方で、十分に高速にサンプリングされた加速度センサの出力の隣接データ間の差分ベクトルをサンプリング時間で除すことで加速度ベクトルの時間微分を近似できる。ここで、ゼロ G オフセット誤差は急激には変動しないため、この差分にはオフセット誤差が含まれない特長がある。加速度の時間微分は、図 5 に示した加速度成分のパターンが持つ周期性と基本的に同様であり、微分演算のため位相がずれたものである。図 7 にその時系列パターンの一例を示し、図 8 には、FFT によるパワースペクトラムを示す。

2.2.3. 進行方位の推定アルゴリズム

2.2.1 節と 2.2.2 節で述べたように、加速度微分ベクトルと角速度ベクトルの成分は、それぞれ表 1 に示す性質を持つ。重力方位ベクトルは常時トラッキングが可能であるので、進行方位ベクトルを決定するのは 1 自由度のパラメータ（すなわち、水平方位角）である。このパラメータを連続的に必要な分解能だけ変動させ、上記の性質に最も良く当てはまる値を進行方位ベクトル

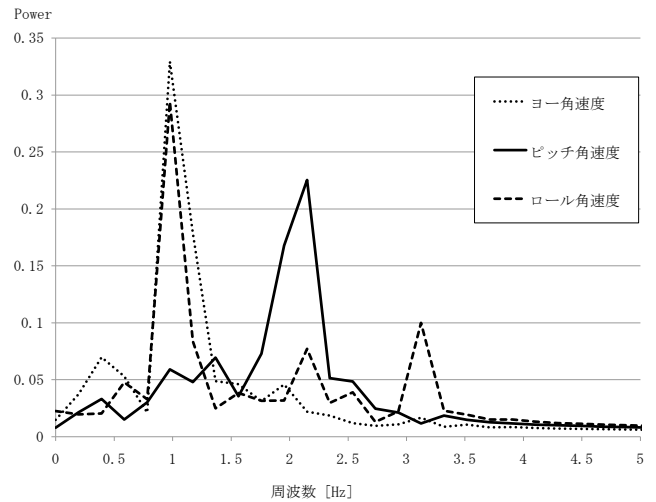


図 6. 角速度成分のパワースペクトラムの一例

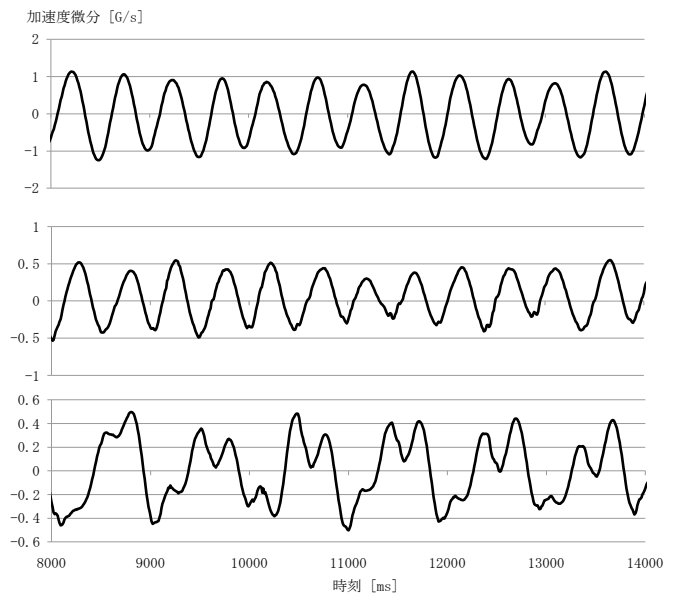


図 7. 加速度微分の時系列パターンの一例
（上段:鉛直方向,中段:左右方向,下段:進行方向）

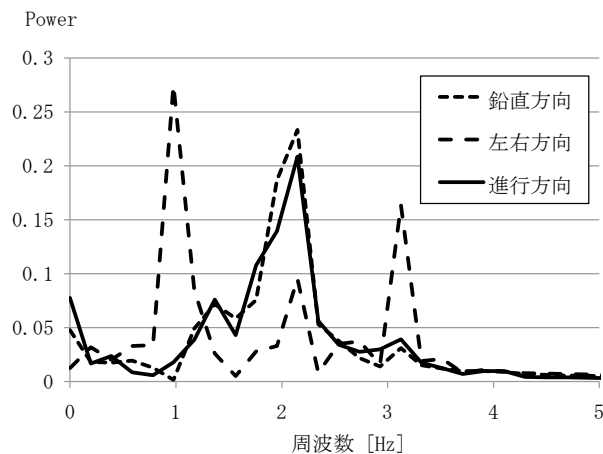


図 8 加速度微分のパワースペクトラムの一例

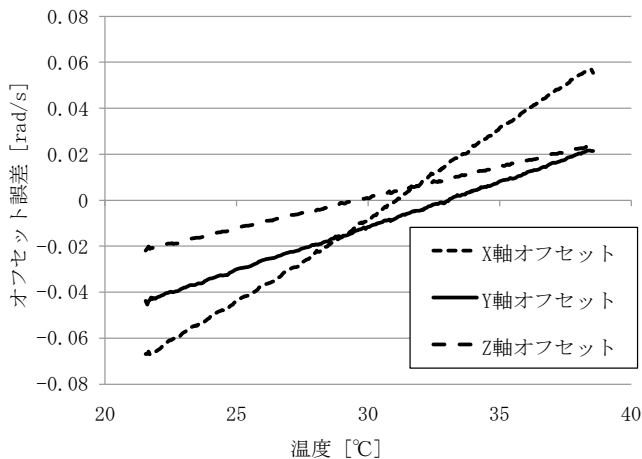


図 9. ジャイロスコープの温度特性の一例

ルとして決定する。

3. 低コストセンサを用いる PDR の技術的課題

PDR の実現に必要な 3 種のセンサのうち、測位性能への影響力がもっとも大きいと考えられるセンサはジャイロスコープである。その角速度出力は恒常的に時間で積分されて端末の姿勢角が推定されるため、角速度の出力に含まれる誤差も同様に積算される。重力加速度による補正ができないヨー軸周りの姿勢角については、地磁気による方位補正がされない限り、その方位の推定誤差は増大していく。このため、そのオフセット誤差を動的に補正し、一定水準以下に抑える技術が欠かせない。

3.1. ジャイロスコープの動的オフセット誤差補正

MEMS 型ジャイロスコープにおいては、オフセット誤差の変動要因は主として温度変化である。そのため、ジャイロスコープに内蔵される温度センサや近傍に配置された温度センサを用いてジャイロスコープの素子の温度を計測し、その温度に基づいてオフセット誤差の推定を行うアプローチが考えられる。図 7 に MEMS 型ジャイロスコープの静止時（ヌルオフセット）出力の温度特性の一例を示す。しかしながら、一般的にジャイロスコープの温度特性はセンサ個体と軸によってばらつきがあることが知られており [4]、このアプローチではセンサ個体（各軸）ごとに温度特性を事前取得する必要がある。経済性の観点から、こうしたキャリブレーション操作を事前に行うことが難しいケースが想定される。

そこで本論文では、PDR では歩行者が移動していない状態を検出できることに着目して、その期間に環境磁場を参照してジャイロスコープの角速度出力に含まれるオフセット誤差を動的に推定するアプローチを取る。ここで、環境磁場は必ずしも地磁気と一致する必

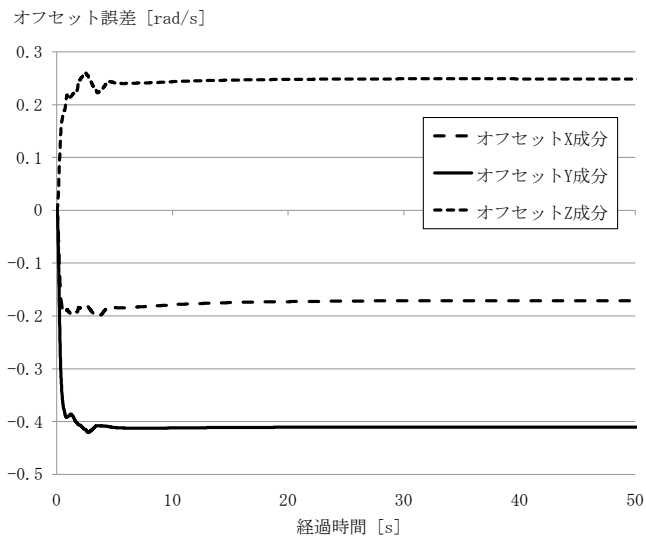


図 10. 動的オフセット補正の実行例

要はなく、静的な磁場であればよいので、動的補正の実行可能な機会を飛躍的に増やすことができる。基本的なフレームワークは文献[1][6]などによって提案された磁場に基づく重力方位と磁気方位の誤差モデルを踏襲している。

図 10 には、MEMS 型ジャイロスコープのオフセット誤差の動的補正を実行した一例を示す。この例では、実行開始から 5 秒以内で非常に大きなオフセット誤差が推定されており、静止時に実測されたデータに収束している。

4. むすび

本論文では、スマートフォン・携帯電話のように自由な保持位置・姿勢で利用されるハンドヘルド端末において、PDR を実現する上での技術的な課題を明らかにして、その解決策を提案した。

今後の課題としては、利用者による端末の保持位置を自動的に推定して、適用する線形パラメータを最適なものに決定する手法の開発が挙げられる。また、PDR は原理的に、単独では永続して測位可能な仕組みではないため、外部の位置・方位補正サービスとの連携は欠かせない。筆者らは、環境マップの制約条件を組み込んで、位置と方位の補正を実現することで、測位性能を向上させている [7]。非力なハンドヘルド端末上で実現可能であるためには、たとえば、クラウド側にこのような比較的計算コストの高い処理サービスを置くことで実現できるものと考えられる。

謝 辞

本研究は、経済産業省委託事業「IT とサービスの融合による新市場創出促進事業」による支援を受けた。

文 献

- [1] 興梠正克、大隈隆史、蔵田武志、「歩行者ナビのための自蔵センサモジュールを用いた屋内測位システムとその評価」、シンポジウム「モバイル08」予稿集、pp. 151-156, 2008.
- [2] E. Foxlin, "Pedestrian Tracking with Shoe-mounted Inertial Sensors", IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 25, No. 6, pp. 38-46, 2005.
- [3] M. Kourogi and T. Kurata, "Personal positioning based on walking locomotion analysis with self-contained sensors and a wearable camera", In Proc. of ISMAR2003,
- [4] D. H. Titterton, J. L. Weston, "Strapdown Inertial Navigation Technology", 2004.
- [5] 中村隆一、齋藤宏、「基礎運動学 第5版」、医歯薬出版、2000.
- [6] J. A. Farrell, "Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors", 2008.
- [7] Tomoya Ishikawa, Masakatsu Kourogi, Takashi Okuma, Takeshi Kurata: "Economic and Synergistic Pedestrian Localization System in Indoor Environments", In Proc. The International Conference on Soft Computing and Pattern Recognition (SoCPaR 2009), pp.522-527 (2009)